

DOI: 10.5846/stxb201806291437

周远刚, 赵锐锋, 赵海莉, 张丽华, 赵敏, 邹建荣. 黑河中游湿地不同恢复方式对土壤和植被的影响——以张掖国家湿地公园为例. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Zhou Y G, Zhao R F, Zhao H L, Zhang L H, Zhao M, Zou J R. Effects of different fallow and wetting methods on soil and vegetation properties in the middle reaches of the Heihe River: a case study of Zhangye National Wetland Park. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

黑河中游湿地不同恢复方式对土壤和植被的影响 ——以张掖国家湿地公园为例

周远刚^{1,2}, 赵锐锋^{1,2,*}, 赵海莉^{1,2}, 张丽华^{1,2}, 赵敏^{1,2}, 邹建荣³

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070

3 张掖国家湿地公园管委会, 张掖 734000

摘要:湿地是自然界最富生物多样性的生态景观和人类社会赖以生存和发展的环境之一,对维护生态系统功能和区域生态安全有着重要意义。为阐明不同湿地恢复方式对土壤和植被的影响,以黑河中游地区张掖国家湿地公园为研究对象,比较了自然恢复方式、恢复利用方式和恢复保护方式下植物多样性、植物生长状态、土壤 pH、盐分、容重、水分含量、有机碳、全氮、全磷、速效氮、速效磷的变化特征,研究表明:在自然恢复方式下,湿地各层土壤全磷、土壤速效磷、土壤速效氮、物种多样性值最高,反映出自然恢复方式可能成为干旱区土壤磷固存的有效手段,适当干扰可能成为干旱区提高物种多样性的有效方法;恢复保护方式下,湿地植物多度最高 165.67 ± 25 ,表明恢复保护方式有助于植被的生长繁殖;恢复利用方式下,湿地各层土壤含水量、土壤有机碳、土壤全氮、植被盖度值最高,土壤盐分含量、土壤 pH 值最低,湿地物种多样性较高。表明恢复利用方式可以有效降低湿地土壤盐分,提高土壤碳、氮含量的潜力,适当人为管理可能成为干旱区湿地恢复过程中提高湿地物种多样性的有效管理方法。该研究结果对于干旱区湿地恢复、保护与重建的效应评估和恢复方式的选择提供一定的理论支持和决策参考。

关键词:湿地;恢复方式;土壤;植被;黑河中游

Effects of different fallow and wetting methods on soil and vegetation properties in the middle reaches of the Heihe River: a case study of Zhangye National Wetland Park

ZHOU Yuangang^{1,2}, ZHAO Ruifeng^{1,2,*}, ZHAO Haili^{1,2}, ZHANG Lihua^{1,2}, ZHAO Min^{1,2}, ZOU Jianrong³

1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China

3 Administration of Zhangye National Wetland Park, Zhangye 734000, China

Abstract: Wetland is one of the most biologically diverse ecological landscapes in nature and the environment for the survival and development of human society. It is of great significance for the maintenance of ecosystem function and regional ecological security. The purpose of this study was to clarify the impacts of different wetland restoration methods on the physical and chemical properties of the soil and the vegetation characteristics. In addition, the application of different wetland restoration methods in arid areas was studied. We used Zhangye National Wetland Park, which is in the middle of the Heihe River, as the research object. Vegetation surveys and soil sampling were conducted in the summer of 2017 on three typical restoration modes in the main area of Zhangye National Wetland Park: natural restoration mode, restoration

基金项目:国家自然科学基金项目(41761043,41261047);西北师范大学青年教师科研能力提升计划团队项目(NWNU-LKQN-17-7)

收稿日期:2018-06-29; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoruifeng@126.com

protection mode, and restoration and utilization mode. The size and road distribution of the area was such that 3—14 samples of 1 m² were used. A total of 25 samples were investigated and it was attempted to ensure that they were evenly distributed within the sample plot. The number and height of individual species were also recorded, and specimens of the individual species were brought back to the laboratory for identification. The soil samples from 0—10, 10—20, and 20—40 cm depth were collected from the center of the sample square by using the ring knife method; these were loaded into aluminum boxes and the fresh weight was measured. Another soil sample was taken from each sampling area and brought back to the laboratory. The litter and roots were collected and dried naturally. To determine the physical and chemical properties of the soil samples collected, they were passed through sieves with diameters of 1 mm, 0.25 mm, and 0.15 mm. The plant diversity, plant growth status, soil pH, soil temperature, and soil temperature under natural restoration, restoration utilization, and restoration protection were compared and analyzed. The variation in the characteristics of salinity, bulk density, water content, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, and available phosphorus were also studied. The results showed that the soil total phosphorus, soil available nitrogen, and species diversity of each layer of wetland were the highest after natural restoration, which indicated that natural restoration could lead to soil phosphorus fixation in arid areas and that appropriate interference may be an effective method to improve species diversity in arid areas. Under the restoration protection mode, the wetland plants had the highest abundance (165.67±25), which indicated that the restoration protection method was conducive to the growth and reproduction of vegetation; the soil water content, soil organic carbon, soil total nitrogen and vegetation coverage were the highest, whereas the soil salt content and the soil pH value was the lowest, and the wetland species diversity was higher. It is shown that the recovery and utilization can effectively reduce the salt content of wetland soil and improve the potential soil carbon and nitrogen content. Appropriate human management may be an effective management method to improve wetland species diversity during the process of wetland restoration in arid areas. The results of this study have provided a theoretical basis and decision-making reference for the evaluation of wetland restoration, protection, and reconstruction effects and the selection of restoration methods in arid areas.

Key Words: wetland; restoration methods; soil; vegetation; middle reaches of the Heihe River

湿地是地球上水-陆相互作用形成的独特生态系统,是自然界最富生物多样性的生态景观之一,在保护生物多样性、存储碳氮、维护区域生态安全等方面发挥着重要作用^[1-3]。随着经济发展、人口增加和城市扩张,越来越多的湿地退化甚至消失^[4],导致湿地生态功能衰减,严重威胁区域生态安全^[5-6]。为减缓和扭转湿地退化及湿地生态环境功能的衰减,世界上许多国家实施了湿地保护和修复措施,随之相关的湿地恢复与保护研究也开始兴起^[7],已成为当前国际湿地科学研究的前沿领域和热点问题^[8]。

近年来,湿地的恢复与保护、湿地恢复效应等问题获得了国内外学者广泛关注,并取得了大量的研究成果。Yepsen 等^[7]、Kolos 等^[9]针对湿地恢复对植被恢复、植物物种多样性的影响进行了研究,发现恢复湿地有利于恢复区植被恢复和物种多样性提高;An 等^[10]针对自然恢复湿地对植被特征的影响展开了研究,得出随着时间增加恢复湿地植被物种多样性高于未恢复湿地,无干扰湿地恢复物种多样性随时间变化而减少,植被盖度和高度随时间变化而增加的结论;Wolf 等^[11]、Badiou 等^[12]针对人工恢复湿地在土壤碳、氮恢复效应等方面展开了研究,发现人工恢复湿地有利于土壤碳氮恢复;Huang 等^[13]研究了湿地恢复对不稳定碳和氮的影响,认为短期内土壤碳氮含量会降低,但随时间变化会逐渐增加;Ballantine 等^[14]、Roon 等^[15]研究了湿地恢复对土壤特性、植被生长、植物多样性的影响,表明湿地恢复有利于土壤恢复、植被生长和物种多样性的增加;Dodds 等^[16]研究了湿地恢复对生态系统服务的影响,认为湿地恢复有利于生态系统的快速恢复,从而提供更多的生态系统服务;Henry 等^[17]在湿地恢复对湿地水生生态的影响方面进行了相关研究,发现长期的湿地恢复,水生生态表现出明显的恢复效果。干旱环境背景控制的干旱区湿地,因其地处气候敏感区和生态脆弱区,

一旦破坏则会威胁整个区域的生态安全和社会经济发展,因此展开对干旱区湿地资源保护与恢复研究显得尤为重要。然而,目前国内相关研究主要集中于三江平原湿地、黄河三角洲湿地等东部湿润地区^[13,18],干旱区仅有艾比湖湿地、塔里木河湿地在湿地恢复和保护对植被、土壤、湿地面积影响等方面的初步研究^[19-20],对于中国第二大内陆河黑河湿地的恢复与保护研究还鲜见报道。

黑河中游湿地位于我国西北内陆干旱区,具有涵养水源、防风固沙、调节气候等多种生态功能,在黑河流域乃至河西走廊生态平衡中发挥着重要作用^[21]。关于黑河湿地的研究主要集中在土壤化学性质的空间分布^[21-22]、植被性状^[23]、动物多样性等^[24],对湿地恢复与保护研究、湿地不同恢复与保护方式效应研究不够深入。为此,本研究选择黑河中游张掖国家湿地公园为研究区域,通过野外调查和采样,研究黑河中游张掖国家湿地公园不同恢复方式对土壤和植被的影响,为干旱区湿地恢复、保护与重建提供理论支持和决策参考。

1 研究区域概况

张掖湿地公园(100°06'—100°45' E, 38°32'—39°24' N)位于张掖市甘州区城郊北部、黑河东侧与市区紧密相连,总面积约 46.02 km²(图 1)。属于典型的温带大陆性气候,年均降水量 129 mm,年均蒸发量 2047 mm,年平均温度 7.4℃,干旱指数达 15.87,日照充足,光能资源丰富,年日照时数在 3085 h^[21]。受黑河及地下水影响,区域内水资源较为充足。研究区的主要植物物种有拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、芦苇(*Phragmites australis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。湿地恢复前,该区域主要由耕地和部分自然湿地和人为湿地组成,地势较为平坦,水源主要来源于黑河地表径流和地下渗水。主要植物物种有芦苇、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、拂子茅以及各种农作物。

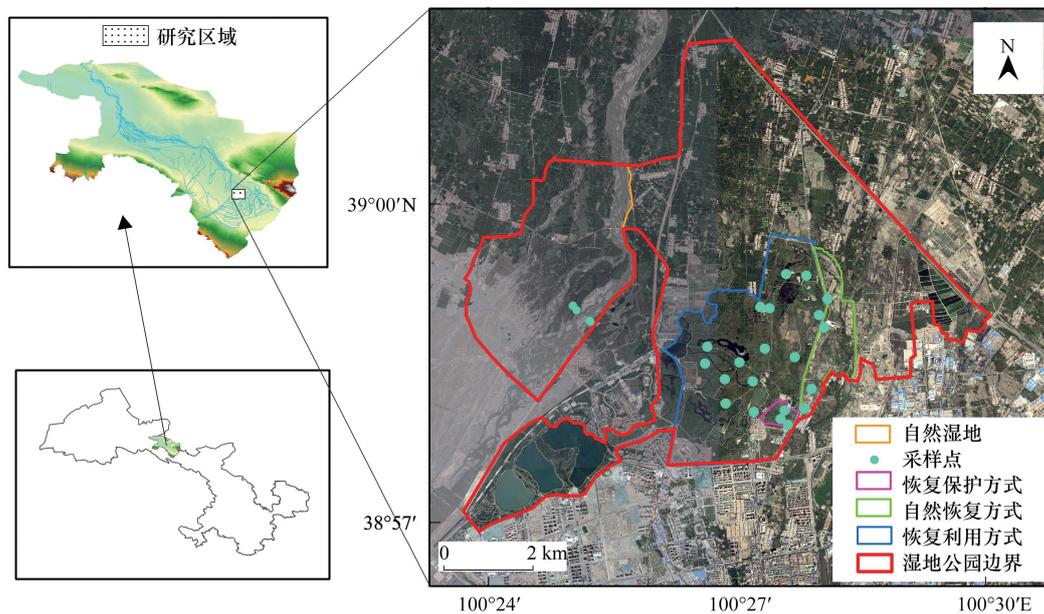


图 1 张掖国家湿地公园的地理位置及恢复区分布

Fig.1 Location of Zhangye National Wetland Park and distribution of restoration areas

RU:恢复利用方式,Restoration and Utilization; RP:恢复保护方式,Restoration and Protection; Nr:自然恢复方式,Natural restoration; Nw:自然湿地,Natural wetland

2 分析方法和数据处理

2.1 样品采集

2017 年夏季在张掖国家湿地公园主体区调查 3 类典型恢复方式:1)退耕后无人参与浇灌、管理等人为参与的湿地恢复方式,简称自然恢复方式(Natural restoration, Nr);2)退耕后人参与建立栅栏隔离,几乎无人类和大

型动物踩踏、干扰,并定时人为浇灌的湿地恢复方式,简称恢复保护方式(Restoration and Protection, RP);3)退耕后建设为旅游景点,修建栈道、观光车道、长廊等基础设施,且常有浇灌、栽种、刈割芦苇等人为参与湿地恢复管理的湿地恢复方式,简称恢复利用方式(Restoration and Utilization, RU)以及一个临近自然湿地(Natural wetland, Nw)作为参考湿地。3种湿地恢复方式于2009—2011年开始湿地恢复,恢复时间差异较小。

同步进行植物与土壤采样,根据区域面积大小和道路分布情况确定3—14个1 m×1 m样方,尽量保证均匀分布于样地内,共调查样方25个。现场鉴定每个样方中的物种类别,同时记录各物种个体数、高度等植物特征,并将个别物种采集标本带回实验室鉴定。采用环刀法在样方中心采集0—10,10—20,20—40 cm土样3个装入铝盒并称鲜重。每个样方另取一份土壤样品带回实验室,检出枯落物和根,自然风干,用1、0.25、0.15 mm直径的土筛筛取土样,进行土壤有机碳、速效氮、全氮、全磷、速效磷、pH、盐分等的测定。

2.2 样品测定

土壤样品的pH值用酸度计(PHS-3C)测定(水土比5:1);水溶性盐总量用重量法测定(水土比5:1);有机碳(SOC)含量用重铬酸钾容量法-消煮法测定;全氮含量采用开式消煮法测定;全磷含量采用硫酸-高氯酸消煮法测定;速效氮采用流动分析仪(SKALAR 8505)测定;速效磷含量采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定^[21];土壤含水量和容重测定采用烘干法,在105℃烘箱中烘8—12 h至恒重。室内分析中,全氮全磷在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成,其他实验都在西北师范大学土壤地理实验室完成。

2.3 数据处理

根据测得的土壤容重、pH、水分含量、全盐量、有机碳、全氮、速效氮、全磷、速效磷以及野外记录的植物个体数、高度等特征值,对不同区域湿地的典型植被和土壤特征进行统计分析。运用EXCEL进行统计数据处理,运用SPSS 17.0均值比较T检验法进行差异性分析,运用Origin对处理后的数据制图。

采用丰富度指数、Shannon-Wiener指数来表征植物群落的物种多样性。

丰富度指数: $R=S$

Shannon-Wiener指数: $H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

重要值(VI): $VI = (\text{相对高度} + \text{相对多度} + \text{相对盖度}) / 3$

相对盖度 = 某种植物的盖度 / 所有植物物种的盖度之和

相对高度 = 某种植物的平均高度 / 所有植物平均高度之和

相对多度 = 某种植物的株数 / 所有植物的株数之和

式中, P_i 为物种*i*的重要值, S 为物种*i*所在样方的物种数。

采用总盖度和总多度来表征植物的生长状态。总盖度指样方内各物种盖度之和,总多度指样方内各物种数量之和。

3 结果

3.1 不同恢复方式对植物的影响

3.1.1 不同恢复方式对植物生长状态的影响

由图2可知,自然恢复方式(53.33 ± 1.71)植被覆盖度显著低于恢复利用方式(98.34 ± 1.66)和恢复保护方式(95.62 ± 2.51) ($P < 0.05$),且恢复保护方式下植被盖度更接近自然湿地。不同湿地恢复方式下单位面积植被多度亦存在较大差异。3种恢复方式植被多度变化趋势为RP>RU>Nr,恢复保护方式与自然恢复方式植被多度差异显著($P < 0.05$),恢复保护方式植被多度更接近自然湿地(图2)。

3.1.2 不同恢复方式对植物多样性的影响

由图3可知,恢复利用方式、恢复保护方式、自然恢复方式物种丰富度指数分别为 4.21 ± 0.39 、 2.67 ± 0.33 、 4.50 ± 1.26 ,且恢复保护方式物种丰富度显著低于自然恢复方式和恢复利用方式($P < 0.05$),优势种分别为芦

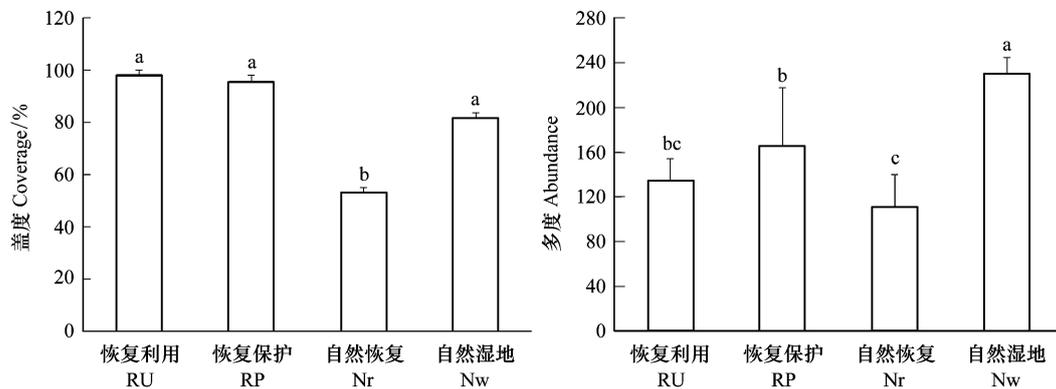


图 2 3 种湿地恢复方式下的植被生长状态

Fig.2 Vegetation growth status in three wetland restoration methods

误差线为标准误差;误差线上的不同字母表示同一指数不同恢复区显著性差异分组($P=0.05$)

苇、芦苇、赖草。不同湿地恢复方式下物种多样性指数也表现出较大差异,其变化趋势与物种丰富度指数一致,自然恢复方式物种多样性指数显著高于恢复保护方式($P<0.05$)(图 3)。自然恢复方式在物种多样性方面更接近自然湿地,但优势物种不是湿生植被。

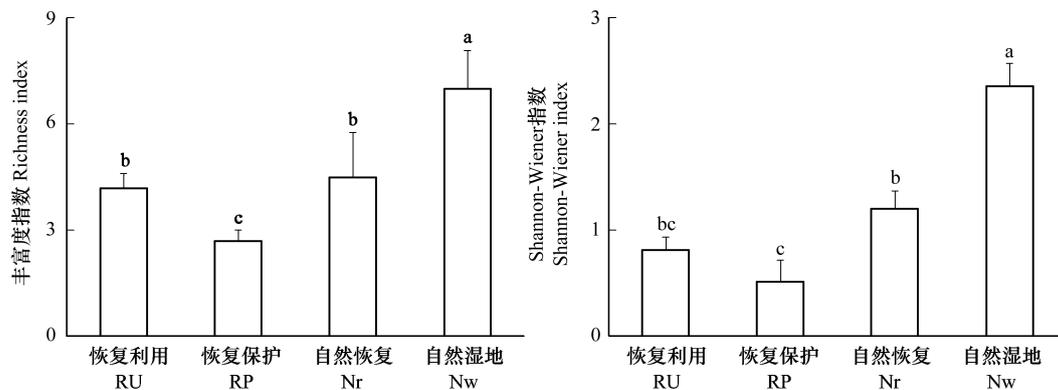


图 3 3 种湿地恢复方式下的物种多样性

Fig.3 Species diversity in three wetland restoration methods

误差线为标准误差;误差线上的不同字母表示同一指数不同恢复区显著性差异分组($P=0.05$)

3.2 不同恢复方式对土壤性状的影响

3.2.1 不同恢复方式对土壤水分含量、盐分、PH 和容重的影响

由图 4 可知,在 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 土层,土壤含水量的分布规律均为 $RU>RP>Nr$,恢复利用方式与自然恢复方式间各层土壤含水量差异显著($P<0.05$)。土壤盐分含量与土壤含水量相反(图 4)。自然恢复方式土壤各层盐分含量与两种人为恢复方式差异显著($P<0.05$)。恢复利用方式土壤含水量与盐分含量更接近自然湿地。

不同湿地恢复方式中,0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 土壤容重、pH 均以自然恢复方式最高,恢复利用方式最低,恢复保护方式居中(图 4)。除 0—10 cm 自然恢复方式与恢复利用方式土壤容重外,3 种湿地恢复方式土壤容重、pH 无显著差异($P>0.05$)。

3.2.2 不同恢复方式对土壤碳、氮、磷的影响

由图 5 可知,在 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 土层,土壤有机碳量的分布规律均为 $RU>RP>Nr$ 。恢复利用方式土壤有机碳含量显著高于自然恢复方式和恢复保护方式($P<0.05$),土壤有机碳含量分别为($18.98\pm$

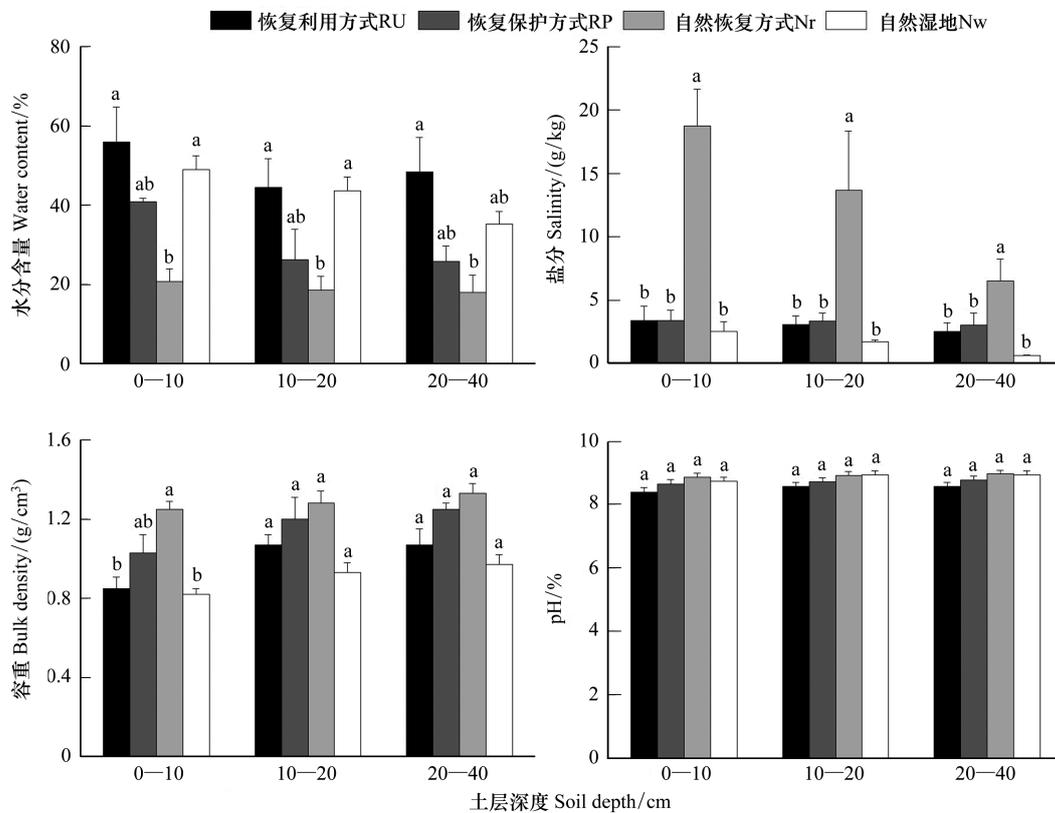


图4 不同湿地恢复方式下的土壤容重、pH、水分含量、盐分

Fig.4 Soil bulk density, pH, moisture content, and salt content under different wetland restoration methods

误差线为标准误差;误差线上的不同字母表示同一土壤层次土壤性状不同恢复区显著性差异分组($P=0.05$)

2.72)、(14.38±1.40)、(13.71±1.97) g/kg; (12.27±1.58)、(10.10±0.50)、(9.1±2.7) g/kg; (11.56±1.67)、(9.38±1.19)、(7.30±0.57) g/kg,自然恢复方式与恢复保护方式无显著差异($P>0.05$)。

土壤全氮含量与土壤有机碳含量分布规律一致(图5)。恢复利用方式各层土壤全氮显著高于自然恢复方式和恢复保护方式($P<0.05$)。0—10 cm和10—20 cm土层土壤全磷含量以自然恢复方式最高,恢复利用方式最低。20—40 cm土层土壤全磷含量以自然恢复方式最高(图5)。除20—40 cm外,自然恢复方式其余土层土壤全磷显著高于两种人为恢复方式($P<0.05$)。恢复利用方式土壤有机碳、全氮、全磷含量更接近自然湿地。

3种湿地恢复方式中,各层土壤速效氮含量的变化趋势均为 $Nr>RU>RP$ (图5)。自然恢复方式速效氮显著高于恢复保护方式和恢复利用方式($P<0.05$),恢复保护方式与恢复利用方式差异并不显著($P>0.05$)。各层土壤速效磷含量变化趋势与有机碳相反(图5)。自然恢复方式与恢复利用方式各层土壤速效磷含量差异显著($P<0.05$)。恢复利用方式土壤速效氮、速效磷含量更接近自然湿地。

4 讨论

4.1 不同恢复方式下植物多样性的变化

本研究结果表明,人工恢复湿地更有助于植被的生长。这与国内外学者的研究结果一致,Kolos等^[9]研究发现人工恢复湿地并进行管理,有利于提高植被盖度;An等^[10]研究发现湿地恢复有利于提高植被盖度,而且短期内单位面积上的植株密度会显著增加;唐娜等^[25]研究表明人工恢复湿地,区域内植被盖度增加,单位面积上植株数量增多。这可能是恢复利用方式和恢复隔离方式下,人为浇灌满足植被生长的水源需求^[26]。

物种多样性是描述生态系统稳定性和持续性的一个指标^[27]。本文的研究结果显示自然恢复方式物种多

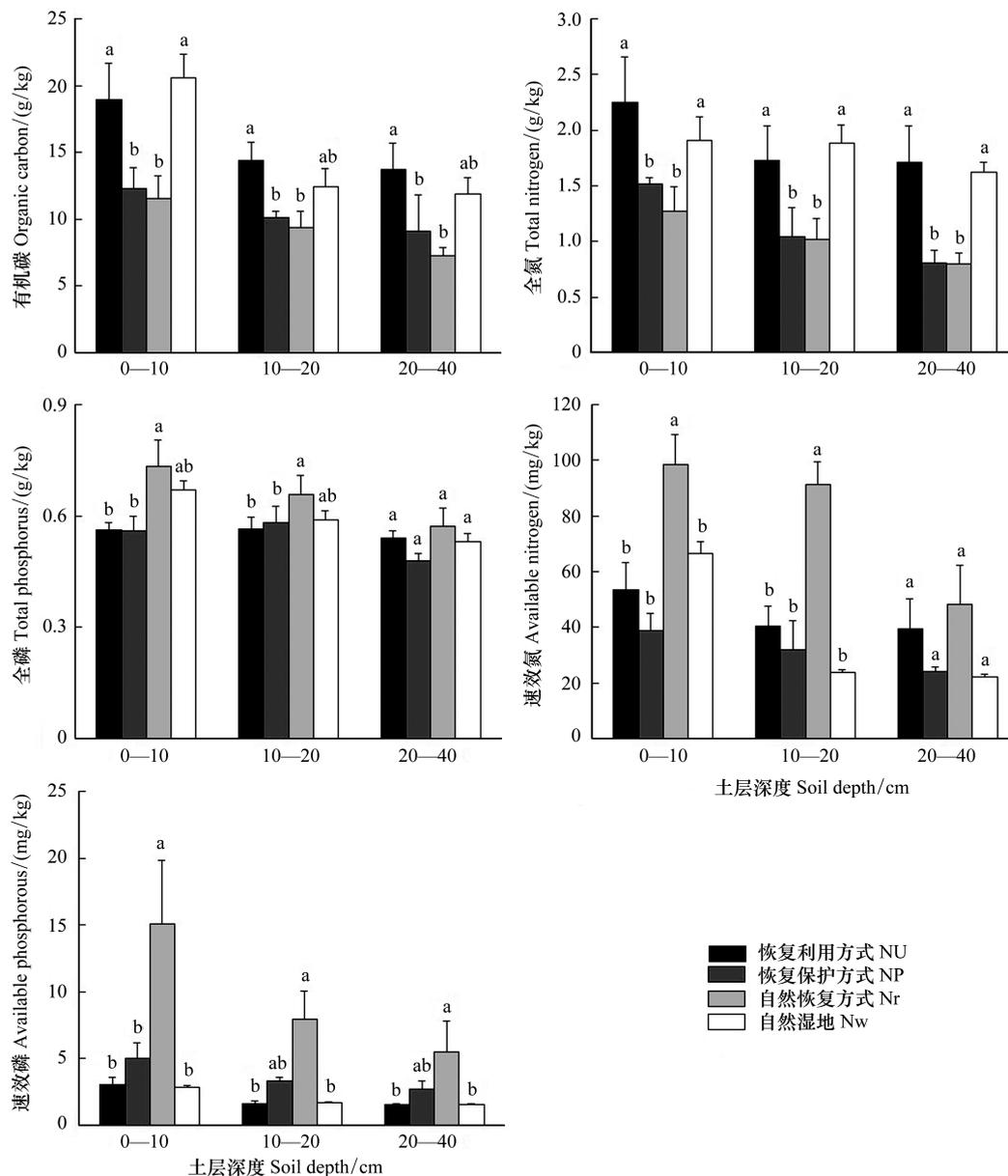


图5 不同湿地恢复方式下的土壤碳、氮、磷

Fig.5 Soil carbon, nitrogen and phosphorus under different wetland restoration methods

误差线为标准误差;误差线上的不同字母表示同一土壤层次土壤性状不同恢复区显著性差异分组 ($P=0.05$)

样性指数高于恢复和恢复保护方式,三种恢复方式中恢复利用方式人为干扰相对较强,自然恢复方式适中,恢复保护方式干扰较弱,符合中度干扰假说^[28]。张立敏等^[29]认为封闭管理更容易导致物种减少甚至消失。本研究中恢复保护方式物种多样性指数最低,正好符合这一观点。

物种丰富度指数表现出与多样性指数相同的特点,自然恢复方式物种丰富度指数最高,恢复保护方式物种丰富度指数最低。陈利项等^[28]认为干扰是影响植物多样性的因素。因此,这种现象出现可能是因为自然恢复方式干扰相对适中,而恢复利用方式干扰较高,恢复保护方式干扰较低。张立敏等^[29]发现封闭管理会降低植物物种丰富度,因此,恢复保护方式物种丰富度指数低于恢复利用方式,可能是因为恢复保护方式下植物群落受外界物种影响小,群落抗干扰能力弱,稳定性差,易达到物种局不灭局或独占所需。

3种湿地恢复方式对于植被的恢复都有一定的促进作用,自然恢复有助于维护物种多样性,但对各种植物的生长发育的促进作用不明显。隔离恢复与自然恢复相反,对物种的生长发育有促进作用,但会影响物

种多样性。恢复利用方式介于二者之间,对物种多样的发展有较好的促进作用,对物种多样性的影响相对较低,是一种比较均衡的恢复方式。

4.2 不同恢复方式下土壤性状的变化

4.2.1 不同恢复方式下土壤水分含量、盐分、pH 和容重的变化

不同湿地恢复方式对土壤容重影响较小,表现出恢复利用方式各层土壤容重最低,自然恢复方式各层容重最高。3种湿地恢复方式所在区域湿地恢复前均为退耕地,土壤容重受湿地恢复前土壤容重差异的影响小,因此土壤容重差异主要是由于人为浇灌引起的土壤水分含量差异导致的。这一结果与赵连春等^[30]研究发现一致,即土壤容重与土壤水分含量呈负相关关系。恢复利用方式与恢复保护方式属于人为恢复湿地,在湿地恢复过程中,恢复保护方式与恢复利用方式有人为浇灌,且恢复利用方式区域内保持有流水。

不同湿地恢复方式对土壤 pH 值影响较小,表现为恢复利用方式 pH 值最低,恢复保护方式 pH 最高。Feyisa 等^[31]认为人工恢复湿地有机碳含量增加会影响土壤中的阳离子,从而影响土壤 pH 值。本研究3种恢复方式中恢复利用方式有机碳含量最高,自然恢复方式最低,与 pH 的趋势一致。因此,3种恢复方式 pH 值的差异可能是有机碳含量的差异导致。唐罗忠等^[32]的研究结果表明碱性土壤在渍水条件下,土壤处于还原状态,pH 值会由酸性降为中性左右。恢复保护方式与恢复利用方式,特别是恢复利用方式,长期人为浇灌,土壤处于渍水状态,满足还原反应条件。因此,3种恢复方式土壤 pH 值的差异也有可能是受人为浇灌引起土壤含水量差异导致。

不同湿地恢复方式对土壤盐分影响显著,恢复利用方式和恢复保护方式土壤盐分显著低于自然恢复方式。田长彦等^[33]认为灌溉排水有溶碱洗盐的作用,能够降低土壤盐碱性。本研究中,恢复利用方式和恢复保护方式经常有人为的灌溉排水,特别是恢复利用方式内经常保持有流水。因此,自然恢复方式盐分显著高于恢复利用方式和恢复保护方式,是因为自然恢复方式缺少人为灌排导致。高进长等^[34]在研究黑河下游河流沿岸土壤养分和盐分是发现土壤含水量越低,盐分越容易积累,本研究3种恢复方式土壤水分含量和盐分差异正好符合这一观点。

4.2.2 不同恢复方式下土壤有机碳、全氮、速效氮的变化

土壤有机碳、氮是土壤养分的重要组成部分,是湿地生态系统的重要生源要素^[35]。研究表明,土壤有机碳、全氮呈现出恢复利用方式高于恢复保护方式,恢复保护方式高于自然恢复方式的特征。尽管恢复保护方式与自然恢复方式差异极小,但仍能够反映人工恢复更有助于有机碳、全氮的积累。对比国内外学者的研究,发现有类似的结果,Yu 等^[11]在研究美国人工恢复湿地后土壤碳氮恢复状况时发现,湿地土壤碳氮含量均增加;Larkin 等^[36]在研究中发现人工恢复湿地土壤有机碳含量会显著增加;Ballantine 等^[14]研究发现人工恢复湿地土壤总氮含量增加;董凯凯等^[18]在黄河湿地恢复研究中发现人工恢复湿地土壤碳氮含量均显著增加。表明干旱区同其他地区相似,人工恢复湿地更有利于土壤碳氮积累。

董凯凯等^[18]指出土壤有机碳和氮含量取决于有机物的输入与输出量,在无人为碳氮输入影响的環境中,土壤有机碳的输入与输出量主要取决于有机残体归还量和有机残体的腐殖化系数,其中输出量主要包括分解、侵蚀、各种生物和非生物条件(土壤含水量等)影响等;氮元素的输入和输出量主要受植物残体的归还量和生物固氮的影响。白军红等^[35]认为恢复淡水湿地中土壤粘粒含量、植物凋落物、土壤含水量、水位显著影响有机碳和总氮的空间分布。Noe 等^[37]认为恢复湿地土壤氮素增减受植被生长状况、水文状况等影响。3种恢复方式在土壤水分含量方面、植被生长性状方面都存在较大的差异,因此本研究中3种恢复方式土壤有机碳、全氮的差异可能是受土壤水分含量、植被等因素的影响。

土壤速效氮是可以被植物直接利用的氮,研究结果显示,研究区土壤速效氮变化与总氮变化趋势完全相反,自然恢复方式明显高于恢复利用方式和恢复保护方式。李晓东等^[38]发现土壤速效氮与土壤 pH 之间呈负相关关系;王长庭等^[39]在研究中发现土壤速效氮含量与土壤水分含量呈显著正相关关系。表明土壤 pH 值越低且水分含量越高时,土壤速效氮含量也就越高。本文的研究结果与之截然相反,恢复利用方式和恢复保护

方式土壤 pH 低于自然恢复方式,且土壤水分含量高于自然恢复方式,但恢复利用方式和恢复保护方式土壤速效氮显著低于自然恢复方式。李磊等^[40]在研究短期土壤渍水对土壤肥力的关系中发现随渍水天数增加,土壤速效氮含量显著降低;Huang 等^[13]认为湿地恢复中短期内氮素会减少,然后受自然过程影响,随时间变化缓慢增加。本研究中恢复利用方式与恢复保护方式湿地恢复年限较短,且经常人工灌溉,较长时间处于渍水状态,土壤速效氮含量有可能降低。

4.2.3 不同恢复方式下土壤全磷、速效磷的变化

磷是植物生长发育的必要营养元素之一,在人类赖以生存的土壤-植物-动物生态系统中起着不可替代的作用^[40]。研究表明,自然恢复方式全磷、速效磷含量最高,恢复利用方式最低。王长庭等^[39]指出磷来源于土壤,不可再生,磷的输入与输出量取决于磷的迁移。Mcdowell 等^[41]在研究中发现,磷会融于水中,随着流水流失;尹炜等^[42]认为,恢复湿地会促进湿地植被生长,从而吸收土壤中的磷,降低了土壤中的磷含量。恢复利用方式、恢复保护方式常有人为浇灌,尤其是恢复利用方式内常保持有流水,磷元素更容易随流水流失。另一方面,从植被生长状况看,恢复利用方式和恢复保护方式植被生长状况良好,对磷的吸收优于自然恢复方式,降低了土壤中的磷含量。

4.3 对湿地恢复和管理的启示

理解干旱区不同的湿地恢复方式对土壤和植被特性影响的方向和范围,可以极大的帮助干旱区湿地恢复与管理工作的开展。从植物多样性保护和植物群落结构维护的角度来看,自然恢复这种适度干扰的恢复方式尽管增加了物种的数量^[9,28,43],有利于物种多样性的维护,却因缺乏水源补给,促进了旱生植物的生长,不利于维护湿地物种多样性,不满足湿地恢复的要求。而恢复利用方式物种多样性较高且优势物种为湿地植被,更有利于维护湿地物种多样性。长期的隔离恢复不是土地可持续利用的恢复方法,因为恢复保护这种干扰极低的恢复方式对植物多样性有负面的影响,而且其他的研究结果也表明了低干扰会降低植物物种多样性^[28,43]。从固碳和固氮角度来看,恢复利用方式这类有人为参与湿地恢复和管理的方式对土壤有机碳和总氮的积累是比较有效的^[18,36]。从植物多样性保护和土壤固碳、固氮两方面考虑,恢复利用方式这种人为湿地恢复方式是比较适用的,根据之前研究结果可以发现,恢复利用方式土壤碳氮含量最高,且物种多样性与自然恢复方式差异并不显著。恢复利用方式植被生长发育状况显著优于自然恢复方式,良好的植被生长、发育状态又有利于碳、氮的积累。此外,良好的植被覆盖,可以减少土壤流失和侵蚀,有利于有机碳的保护和存储。恢复利用方式有最高的有机碳和全氮含量,表明在研究区进行类似于恢复利用方式的湿地恢复具有很高的提高土壤碳氮的潜力。

5 结论

黑河中游张掖国家湿地公园的不同区域的土壤和植被特征由于恢复方式的不同(RU、RP、Nr)而差异明显($P < 0.05$)。在自然恢复方式下,湿地各层土壤全磷、土壤速效磷、土壤速效氮、植物多样性值最高,反映出干旱区自然恢复方式可能成为干旱区土壤磷固存的有效手段,适当干扰可能成为干旱区提高物种多样性的有效方法。恢复保护方式下,湿地植物多度值最高,其值为 165.67 ± 25 ,表明恢复保护方式有助于植物的生长繁殖。恢复利用方式下湿地各层土壤含水量、有机碳、全氮、植被盖度值最高、湿地物种多样性较高,全盐、pH 值最低。表明恢复利用方式可以有效降低湿地土壤盐分,提高土壤碳氮含量的潜力,适当的人为管理可能成为干旱区湿地恢复过程中提高物种多样性的有效管理方法。湿地保护和恢复管理部门应该仔细考虑其恢复目标,针对不同恢复目标制定不同湿地恢复方式。

参考文献 (References):

- [1] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature*, 2001, 411(6838): 687-689.
- [2] Zhang L, Wang M H, Hu J, Ho Y S. A review of published wetland research, 1991-2008: Ecological engineering and ecosystem restoration.

- Ecological Engineering, 2010, 36(8): 973-980.
- [3] Hefting M M, van den Heuvel R N, Verhoeven J T A. Wetlands in agricultural landscapes for nitrogen attenuation and biodiversity enhancement: opportunities and limitations. Ecological Engineering, 2013, 56: 5-13.
- [4] Sakané N, Alvarez M, Becker M, Böhme B, Handa C, Kamiri H W, Langensiepen M, Menz G, Misana S, Mogha N G, Möselers B M, Mwita E J, Oyieke H A, Van Wijk M T. Classification, characterisation, and use of small wetlands in East Africa. Wetlands, 2011, 31(6): 1103-1116.
- [5] Nie Y, Li A N. Assessment of alpine wetland dynamics from 1976-2006 in the vicinity of mount Everest. Wetlands, 2011, 31(5): 875-884.
- [6] Klement T, Martin P, Dietrich B, Lorang M S. Multiple stressors in coupled river-floodplain ecosystems. Freshwater Biology, 2010, 55(S1): 135-151.
- [7] Yepsen M, Baldwin A H, Whigham D F, McFarland E, LaForgia M, Lang M. Agricultural wetland restorations on the USA Atlantic Coastal Plain achieve diverse native wetland plant communities but differ from natural wetlands. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 11-20.
- [8] 杨永兴. 从魁北克 2000-世纪湿地大事件活动看 21 世纪国际湿地科学研究的热点与前沿. 地理科学, 2002, 22(2): 150-155.
- [9] Kołos A, Banaszuk P. Mowing as a tool for wet meadows restoration; Effect of long-term management on species richness and composition of sedge-dominated wetland. Ecological Engineering, 2013, 55: 23-28.
- [10] An Y, Gao Y, Tong S Z, Lu X G, Wang X H, Wang G D, Liu X H, Zhang D J. Variations in vegetative characteristics of *Deyeuxia angustifolia* wetlands following natural restoration in the Sanjiang Plain, China. Ecological Engineering, 2018, 112: 34-40.
- [11] Wolf K L, Ahn C, Noe G B. Development of soil properties and nitrogen cycling in created wetlands[J]. Wetlands, 2011, 31(4): 699-712.
- [12] Badiou P, McDougal R, Pennock D, Clark B. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration potential in restored wetlands of the Canadian prairie pothole region. Wetlands Ecology and Management, 2011, 19(3): 237-256.
- [13] Huang J Y, Song C C, Nkrumah P N. Effects of wetland recovery on soil labile carbon and nitrogen in the Sanjiang Plain. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(7): 5861-5871.
- [14] Ballantine K, Schneider R, Groffman P, Lehmann J. Soil properties and vegetative development in four restored freshwater depressional wetlands. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(4): 1482-1495.
- [15] Van Roon M R. Wetlands in the Netherlands and New Zealand: Optimising biodiversity and carbon sequestration during urbanisation. Journal of Environmental Management, 2012, 101: 143-150.
- [16] Dodds W K, Wilson K C, Rehmeier R L, Knight G L, Wiggam S, Falke J A, Dagleish H J, Bertrand K N. Comparing ecosystem goods and services provided by restored and native lands. BioScience, 2008, 58(9): 837-845.
- [17] Henry C P, Amoros C, Roset N. Restoration ecology of riverine wetlands: A 5-year post-operation survey on the Rhône River, France. Ecological Engineering, 2002, 18(5): 543-554.
- [18] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 杨宝山, 解伏菊. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征. 生态学报, 2011, 31(16): 4778-4782.
- [19] 朱长明, 张新, 李均力, 骆剑承. 生态调水前后塔河下游湿地时空变化监测. 资源科学, 2014, 36(2): 420-425.
- [20] 毋兆鹏, 金海龙, 王范霞. 艾比湖退化湿地的生态恢复. 水土保持学报, 2012, 26(3): 211-215, 221-221.
- [21] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 姜朋辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 地理科学, 2013, 33(3): 363-370.
- [22] 白娜, 王立, 孔东升. 黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究. 草业学报, 2017, 26(5): 15-28.
- [23] 徐婷, 赵成章, 韩玲, 郑慧玲, 冯威, 段贝贝. 张掖湿地旱柳叶水势与中脉性状的关联性. 生态学报, 2017, 37(10): 3335-3343.
- [24] 冯威, 赵成章, 岳冉, 张翔, 金建鑫. 张掖国家湿地公园冬春季鸟类群落多样性和相似性分析. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2224-2231.
- [25] 唐娜, 崔保山, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复. 生态学报, 2006, 26(8): 2616-2624.
- [26] 张彬, 朱建军, 刘华民, 潘庆民. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [27] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, Escudero A, Ochoa V, Delgado-Baquerizo M, García-Gómez M, Bowker M A, Soliveres S, Escolar C, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Gozalo B, Gallardo A, Aguilera L, Arredondo T, Blones J, Boeken B, Bran D, Conceição A A, Cabrera O, Chaieb M, Derak M, Eldridge D J, Espinosa C I, Florentino A, Gaitán J, Gatica M G, Ghiloufi W, Gómez-González S, Gutiérrez J R, Hernández R M, Huang X W, Huber-Sannwald E, Jankju M, Miriti M, Moneris J, Mau R L, Morici E, Naseri K, Ospina A, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres-Díaz C, Val J, Veiga J P, Wang D L, Zaady E. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. Science, 2012, 335(6065): 214-218.
- [28] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. 生态学报, 2000, 20(4): 581-586.
- [29] 张立敏, 陈斌, 李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性. 生态学报, 2010, 30(6): 1556-1563.
- [30] 赵连春, 赵成章, 陈静, 王继伟, 李群. 秦王川湿地不同密度桤柳枝-叶性状及其光合特性. 生态学报, 2018, 38(5): 1722-1730.
- [31] Feyisa K, Beyene S, Angassa A, Aid M Y, De Leeuw J, Abebe A, Megersa B. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. CATENA, 2017, 159: 9-19.
- [32] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 黄宝龙. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化. 生态学报, 2005, 25(1): 103-107

- [33] 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068.
- [34] 高进长, 苏永红, 席海洋, 鱼腾飞. 黑河下游河流沿岸土壤养分和盐分的研究. 水土保持学报, 2012, 26(5): 94-98, 102-102.
- [35] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 栾兆擎, 张玉霞. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498.
- [36] Larkin D J, Steffen J F, Gentile R M, Zirbel C R. Ecosystem changes following restoration of a buckthorn-invaded woodland. *Restoration Ecology*, 2014, 22(1): 89-97.
- [37] Noe G B, Hupp C R, Rybicki N B. Hydrogeomorphology influences soil nitrogen and phosphorus mineralization in floodplain wetlands. *Ecosystems*, 2013, 16(1): 75-94.
- [38] 李晓东, 魏龙, 张永超, 郭丁, 李旭东, 傅华. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤理化性状的影响. 草业学报, 2009, 18(4): 103-110.
- [39] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 尚占环, 丁路明. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系. 草业学报, 2005, 14(4): 15-20.
- [40] 李磊, 崩婕, 刘昭伟, 睢宁, 周治国. 花铃期短期土壤渍水对土壤肥力和棉花生长的影响. 水土保持学报, 2013, 27(6): 162-166, 171-171.
- [41] McDowell R W, Nash D M, Robertson F. Sources of phosphorus lost from a grazed pasture receiving simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(5): 1281-1288.
- [42] 尹炜, 李培军, 裘巧俊, 宋志文, 席俊秀. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献. 生态学杂志, 2006, 25(2): 218-221.
- [43] Petersen J E, Brandt E C, Grossman J J, Allen G A, Benzing D H. A controlled experiment to assess relationships between plant diversity, ecosystem function and planting treatment over a nine year period in constructed freshwater wetlands. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 531-541.